

**РАЗРАБОТКА БАЗЫ ДАННЫХ ДЕФЕКТОВ ЛОПАТОЧНОГО
АППАРАТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ГАЗОТУРБИННЫХ
УСТАНОВОК С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ КОМПЬЮТЕРНОГО
ЗРЕНИЯ**

Беляев О.В., Блинов В.Л.

ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина»,
Екатеринбург, Россия

belyaev_oleg09@mail.ru v.l.blinov@urfu.ru

Аннотация. В настоящей работе представлена база данных дефектов лопаточного аппарата осевого компрессора газотурбинного двигателя. В ходе разработки которой был проведен анализ научно-технической информации по дефектам лопаточного аппарата. Разработаны критерии описания дефектов, позволяющие в полной мере дать характеристику повреждения. Представлены данные по влиянию дефектов на газодинамические характеристики, статическую и динамическую прочность, результаты численных и натурных исследований. Изложены геометрические параметры профиля, изменяющееся при образовании дефектов.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, осевой компрессор, лопатка, дефекты, база данных, критерии, компьютерное зрение.

**DEVELOPMENT OF THE DATABASE OF BLADE DEFECTS TO
INCREASE THE REALIABILITY OF GAS TURBINE PLANTS USING
COMPUTER VISION TECHNOLOGE**

Belyaev O., Blinov V.

Yeltsin UrFU, Yekaterinburg, Russia

Abstract. This paper presents a database of defects in the blade apparatus of an axial compressor of a gas turbine engine. In the course of the development of which, the analysis of scientific and technical information on the defects of the blade apparatus was carried out. The criteria for the description of defects have been developed, which make it possible to fully characterize the damage. Data on the influence of defects on gas-dynamic characteristics, static and dynamic strength, results of numerical and field studies are presented. The geometrical parameters of the profile, which change during the formation of defects, are presented.

Key words gas turbine engine, axial compressor, blade, defects, database, criteria, computer vision.

Газотурбинные двигатели (ГТД) широко применяются в различных отраслях промышленности. Авиационная и морская техника, энергетика, промышленность, транспорт являются объектами применения ГТД.

Техническое обслуживание ГТД и газотурбинных установок (ГТУ) играет важную роль в обеспечении надежной и долговечной эксплуатации энергетических машин. Двигатели подвергаются воздействию экстремальных факторов окружающей среды, таких как механические нагрузки, высокие давления и рабочие температуры, а также, в ходе эксплуатации, возможно, попадание посторонних предметов в проточную часть осевого компрессора (ОК). Эти факторы увеличивает риск повреждения лопаток двигателя. По этой причине важно обеспечить высококачественный осмотр и техническое обслуживание двигателей, чтобы выявить любые повреждения на самой ранней стадии, прежде чем они перерастут в более серьезные последствия.

Существует несколько уровней проверки и контроля состояния лопаточного аппарата ГТД. Уровни проверки условно можно разделить на два основных типа контроля: осмотр эндоскопом на месте, без снятия двигателя, и контроль модулей и деталей, когда двигатель проходит мероприятия технического обслуживания и ремонта. Хотя осмотр эндоскопом является важным первым средством проверки для определения работоспособности и состояния деталей, он также имеет ограничения, связанные с относительно низким качеством изображения и плохими условиями освещения внутри двигателя [1, 2].

Во время визуального осмотра дефектолог получает лопатку и оценивает состояние, выявляя любые повреждения. При обнаружении дефекта специалист должен принять решение, является ли он приемлемым, т. е. проверить, находится ли он в установленных пределах для двигателя. Решение основано на опыте дефектолога и в некоторой степени на его склонности к риску. Обе задачи, обнаружение и оценка дефектов, являются трудоемкими и утомительными процессами, которые подвержены человеческим ошибкам, вызванными усталостью или халатностью. Ошибки влекут за собой риск пропустить критический дефект при осмотре.

Таким образом, существует необходимость преодолеть эти риски и разработать другой метод обнаружения дефектов. Использование автоматизированных систем обнаружения дефектов позволит обнаружить и локализовать дефект, а также оценить его геометрические параметры. Автоматизированная система обнаружения дефектов позволит снизить нагрузку на дефектолога, что приведет к снижению затрат на оплату труда и повышению эффективности предприятия, на котором будет применена данная система. Для реализации системы необходимо задействовать технологию компьютерного

зрения.

Для функционирования систем автоматического обнаружения дефектов, которые уже существуют [3], и расширения их возможностей использования, требуется база данных (БД) по дефектам лопаточного аппарата ОК. Для написания алгоритмов обнаружения конкретных дефектов следует изучить возможные повреждения и оценить степень их влияния на процесс эксплуатации ГТД.

В данный момент общедоступная база данных для дефектов лопаточного аппарата ОК до настоящей работы отсутствовала. При этом известны такие информационные системы в различных отраслях, например, база данных по дефектам металла трубопроводов и оборудования атомных электростанций [4].

В рамках текущего исследования была разработана классификация дефектов в БД с учетом их влияния на течение в проточной части ОК. БД позволит оперативно определить возможность дальнейшей эксплуатации установки, при появлении и развитии конкретного дефекта, а также допустимость использования лопаток с отклонениями в геометрии после ремонта.

Существуют различные стандарты и публикации, где описаны дефекты ЛА газотурбинного двигателя. Например, в работе [5] представлено описание исследования по выявлению дефектов лопаточного аппарата ГТД, категоризация потенциальных причин, сгруппированных по характеру первопричин, послуживших к образованию дефекта, а также их взаимосвязей. Причинами дефектов могут послужить как окружающая среда, плохое техническое обслуживание, плохое производство, так и другие источники.

На основании анализа исследовательских работ, экспериментов, стандартов и других публикаций, где описаны дефекты лопаточного аппарата ОК, было сформировано 4 группы дефектов: повреждение поверхностного слоя, износ, разделение материала и деформация материала.

Одним из этапов выполнения работы являлась разработка критериев описания дефектов для функционирования БД:

1. Геометрический параметр (как повлиял дефект на геометрию лопатки). Для определения геометрических параметров и степени их изменения использовалось собственное математическое описание формы лопатки [6]. Такой подход позволяет выполнять достаточно точное построение профилей ЛА с возможностью внесения некоторых дефектов на всех участках и сечениях лопатки, а также автоматическую интеграцию модели лопатки с дефектами в различные программные комплексы численного моделирования для последующего анализа. Математическое описание профиля лопатки представлено следующими геометрическими параметрами: радиусы входной и

выходной кромки ($R_{вх}$; $R_{вых}$), угол установки профиля (β_y), хорда профиля (b), углы их заострения (φ_1 ; φ_2), входные и выходные лопаточные углы ($\beta_{1л}$, $\beta_{2л}$). Для построения кромок, спинки и корытца используются кривые Безье. Если такое математическое описание нельзя использовать для точного построения профиля лопатки с определенным дефектом, например, трещиной или царапиной, то в БД выводится значение о «местном» (ручном) внесении дефекта. В некоторой степени данный критерий показывает применимость предложенного математического описания для автоматического внесения дефекта ЛА в численную модель ОК.

2. Описание дефекта. Данный критерий позволяет емко и точно донести основную информацию о дефекте и его особенностях, которая поможет обнаружить и классифицировать дефект.

3. Возможные причины возникновения дефекта. Возможные причины отказа оборудования с конкретным дефектом лопаток классифицированы согласно руководству по техническому обслуживанию авиационной техники [59] на следующие категории: усталость, плохое производство, плохое техническое обслуживание, эксплуатационные причины, окружающая среда, воздействие иных факторов. Категории причин также разделяются на несколько подгрупп, из которых уже определяется конкретная причина рассматриваемого дефекта.

4. Влияние дефекта на газодинамические характеристики. Данный критерий наполняется на основе анализа научных работ и публикаций. Собственные исследования методом численного моделирования также могут являться источником данных для данного критерия. Учитывается влияние дефекта на характеристики, как отдельной ступени компрессора или всей его проточной части, так и на газотурбинный двигатель в целом.

5. Влияние дефекта на прочность. Критерий наполняется аналогично предыдущему пункту, учитывается влияние дефекта ЛА на статическую и динамическую прочность.

6. Влияние дефекта на вибрационные характеристики. Наличие такого отдельного раздела в БД позволит диагностам принимать во внимание возможные причины роста вибрации оборудования. Ввиду установки приборов и датчиков на корпусах осевого компрессора, некоторые дефекты не способны оказать серьезного вклада в повышении вибрации установки. Можно рассмотреть лишь явные, обширные дефекты.

7. Вероятность проявления дефекта. Вероятность проявления дефекта складывается из статистической оценки отказов ГТД, рассмотренных в различных исследованиях. При этом обобщать данные по всем ГТД сложно, поскольку условия эксплуатации и предназначение двигателя оказывают большое влияние на вероятность какого-либо дефекта. Например, вертолетный

ГТД нередко подвержен эрозии, в то время в стационарных (например, энергетических) установках эрозия развивается существенно медленнее. В совершенстве предприятию, которое использует БД, необходимо позаботиться о наполнении критерия точными данными по конкретному ОК.

8. Допуски, требования и регламентирующие документы. В данном разделе указываются документы, на которые необходимо опираться при сравнении дефектной лопатки с эталонной. Чаще всего это отраслевой стандарт [36] или руководство по технической эксплуатации. Также в настоящем критерии отмечаются допускаемые повреждения ЛА с текущим дефектом и контролируемые геометрические параметры в ходе проведения дефектации.

9. Рекомендации. Такие данные предоставляют собой описание возможных действий по предупреждению повреждений в эксплуатации либо предложений по проведению ремонтных работ и т. п.

10. Результаты численного либо натурального эксперимента. Исходя из результатов эксперимента можно судить о влиянии дефекта на работу ступени компрессора. В некоторых постановках экспериментов возникает возможность оценить влияние «мелких» дефектов на характеристики компрессора.

11. Изображение дефекта. В данном критерии предоставляются наглядные изображения дефекта, которые, в том числе, необходимо накапливать для включения БД в системы автоматического обнаружения дефектов. Накопление большого объема изображений требуется для обучения системы с применением технологий компьютерного зрения. Также данный критерий включает в себя информацию и методы, которые используются для обработки, распознавания и анализа изображения дефекта ЛА.

Перспективы настоящей работы открывают возможность использования технологии компьютерного зрения в энергетической и авиационной промышленности. Реализация БД в цифровой среде позволяет совершенствовать и использовать ее различными предприятиями, то есть база данных может наполняться результатами и накопленным опытом других исследователей.

Библиографический список

1. Чигрин, В.С. Визуальная диагностика элементов проточной части ГТД: Учебное пособие / В.С. Чигрин, Б.М. Конюхов. – Рыбинск: РГАТА, 2008. – 51 с.
2. Qin, Y. Cao, J. Application of Wavelet Transform in Image Processing in Aviation Engine Damage / Y. Qin, J. Cao // Appl. Mech. Mater. – 2013, p. 347-350.
3. Aust J. Automated Defect Detection and Decision-Support in Gas Turbine Blade Inspection / J. Aust, S. Shankland, D. Pons, R. Mukundan, A. Mitrovic // Aerospace. – 2021. – № 8(30). – 27 pp.

4. Кораблева С. А. Компьютерная база данных по дефектам металла оборудования и трубопроводов атомных электростанций / С. А. Кораблева, В. С. Рубцов // Ядерная и радиационная безопасность – 2017. № 2(84). – 7 с.
5. Aust. J. Taxonomy of Gas Turbine Blade Defects / J. Aust, D. Pons // Published in Aerospace. – 2019. № 6(5). – 35 pp.
6. Зубков И. С. Разработка модели учета влияния дефектов лопаточного аппарата компрессора на параметры работы газотурбинной установки / И. С. Зубков, В. Л. Блинов // Актуальные проблемы развития технических наук: сборник статей участников XXIII Областного конкурса научно-исследовательских работ «Научный Олимп» по направлению «Технические науки». – Екатеринбург: Уральский федеральный университет. – 2020. – С. 10-17.